

## VIBRACIONES DE TERRENO

Ing. Miguel L. Robert  
Ing. José A. Salassa

### Resumen

En la actualidad se ha desarrollado el control de vibraciones producidas por distintas fuentes. El objeto de esta comunicación es dar una idea general sobre el mencionado control y en particular tratar de introducir en las metodologías que se utilizan cuando las vibraciones son producidas por voladuras, (desmontes, grandes excavaciones y/u obras subterráneas).

El incremento del tráfico vehicular; construcción de edificios en zonas densamente pobladas; el funcionamiento de máquinas herramientas y el uso de explosivos para excavación en roca, provocan efectos indeseables en lo concerniente a ruidos y vibraciones de tierra, por lo que el estudio de vibraciones originadas por distintas fuentes, está dirigido a encontrar relaciones que ligen el origen de aquéllas con las eventuales molestias y/o daños que pudieran afectar a personas, edificios, instrumentos de precisión etc.

Los parámetros involucrados en la medición de vibraciones son:

**Amplitud de desplazamiento:** (A) medida en mm o  $\mu$  corresponde a la mitad del desplazamiento pico a pico total.

**Velocidad de Vibración:** (V) Es el régimen de cambios de desplazamiento (se mide en mm/seg o cm/seg).

**Aceleración de la partícula:** (a): Se define como el régimen de cambio de velocidad (las unidades son cm/seg<sup>2</sup> o mm/seg<sup>2</sup>).

**Frecuencia de la onda (f)** es el número de veces que un ciclo se repite en la unidad de tiempo (se la mide en ciclos/seg.)

Si la onda vibratoria se supone sinusoidal (este caso se produce con el funcionamiento de maquinarias) los parámetros arriba mencionados están relacionados por las siguientes ecuaciones.

$$V = 2 \pi f A \text{ [ mm/seg ] o [ cm/seg ]}$$

$$a = 4 \pi^2 f^2 A \text{ [ mm/seg}^2 \text{ ]}$$

Cuando, además de conocer la velocidad de vibración de la partícula se dispone de la velocidad de propagación sísmica de las ondas elásticas, un excelente parámetro para evaluar el nivel de daños en las construcciones civiles es el cociente entre ambas que se define como "ángulo de cizalladura"

$$\angle c = \frac{V \text{ partícula}}{V \text{ sísmica}} \text{ [ m.m./m.t. ]}$$

El rango de frecuencias de vibración producidas por una fuente de energía varía entre 5 y 900 Hz, correspondiendo los altos valores a las proximidades de la fuente, disminuyendo éstos a medida que nos alejamos de la misma en función del tipo de terreno que las ondas deben atravesar.

En lo que respecta a voladuras con explosivos en roca, los parámetros involucrados en la operación son:

Cantidad de carga explosiva detonada por unidad de retardo (Q en kg); distancias entre el punto de explosión y el punto de medición (D en metros), factor de Daños (D); constante del lugar (K) y el nivel de energía (Ez).

Para construcciones con fundaciones sobre roca dura, un parámetro llamado Nivel de Carga puede usarse en el planeamiento del programa de cargas

$$\text{Nivel de Carga } N_c = Q \times R^{2/3}$$

Sin embargo, en áreas de rocas malas, de pobres características de propagación de ondas, estas relaciones no son válidas y una fórmula que da la velocidad aproximada para el desplazamiento de la partícula establece que:

$$A = K.Q.R^{-1}$$

### Aspectos Prácticos de la medición de Vibraciones

Cuando se intenta medir la velocidad de vibración en un punto es necesario hacerlo simultáneamente en tres direcciones definidas para luego componerlos. Es de práctica elegir tres direcciones ortogonales y de las posibles las de mayor uso son una vertical y dos horizontales (una coincidencia con la línea de propagación y otra normal a dicha línea).

Entonces se tiene:

- $V_z$  = componente vertical de  $V_p$
- $V_x$  = componente horizontal de  $V_p$  a lo largo de la línea de propagación
- $V_y$  = componente horizontal normal a  $x$

Con estos componentes podemos calcular:

$$V_p = (V_x^2 + V_y^2 + V_z^2)^{1/2}$$

Siendo las unidades usadas de  $V_p = [ \text{mm/seg} ]$

Las mediciones están siempre hechas a nivel de base de las fundaciones de muro o de construcciones (frecuentemente los niveles mayores se obtienen en las zonas más altas de las estructuras).

La obtención de sismogramas comparables requiere el uso de instrumental perfectamente calibrado y confiable.

Algunos instrumentos (como el caso de Vibra Amp de Atlas Copco) son calibrados de modo que las deflexiones leídas en los sismogramas corresponden a la velocidad de partícula en el punto de medición y es posible determinar la amplitud y la aceleración del mismo con el siguiente ábaco en el cual se entra con  $V_p$  y la frecuencia (que también se obtiene del sismograma correspondiente).

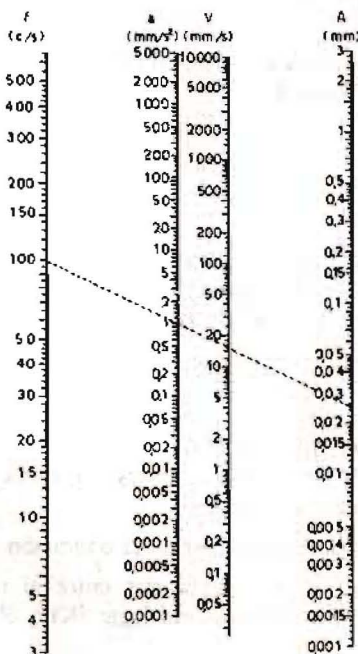


GRAFICO DE LANGEFORS Y KIHLSSTRÖM

## DAÑOS:

A continuación se describe la experiencia realizada en la medición de vibraciones ocasionadas por voladuras en la construcción de Túneles y Galerías de ensayo.

En estos casos en la actualidad existen distintos criterios que sirven para cuantificar los efectos producidos por las vibraciones debidas a las voladuras.

### a) Criterio Americano

U.S.B. of Mines usa como parámetro más adecuado para estimar el riesgo de daños la velocidad de vibración de la partícula:

$$V = K (D/Q)^{-x}$$

En donde:

V = es el máximo de velocidad de vibración registrado en el curso de la voladura expresado en mm/seg.

K = constante a determinar por ensayo

D = distancia entre el punto de explosión y el punto de medición (en metros)

Q = carga total detonada por unidad de retardo

X = exponente > 0 que se determina mediante ensayos

Las normas establecen un límite de Velocidad como medio de seguridad V = 50 mm/seg.

### b) Criterio de Ambraseys y Hendron

La fórmula que utiliza es  $V = K \left( \frac{D}{\sqrt[3]{Q}} \right)^{-b}$

V = velocidad de la partícula expresada en cm/seg

D = distancia entre barreno y punto de medición

Q = carga detonada por unidad de retardo

K y b: constantes experimentales

### c) Criterio de Langefors y Kihlström

(Criterio Sueco)

$$V_{max} = K \sqrt{\frac{Q}{D^{3/2}}}$$

Los niveles de daños establecidos figuran en la tabla adjunta.

Velocidad de partícula V (mm/seg)	DAÑOS	Observaciones
50	Ninguna fisura	Límite de absoluta seguridad
70	Ninguna fisura aparente	
100	Fisuras insignificantes	
150	Fisuras	
225	Fisuras grandes	
300	Caída de piedras en galerías	
400	Nuevas fisuras en la roca	
1.400	Fisuras de revestim. de túneles	

La relación entre frecuencia, amplitud, daño y velocidad de partícula viene dado por el siguiente gráfico con experiencias realizadas por Langefors y Kihlström:



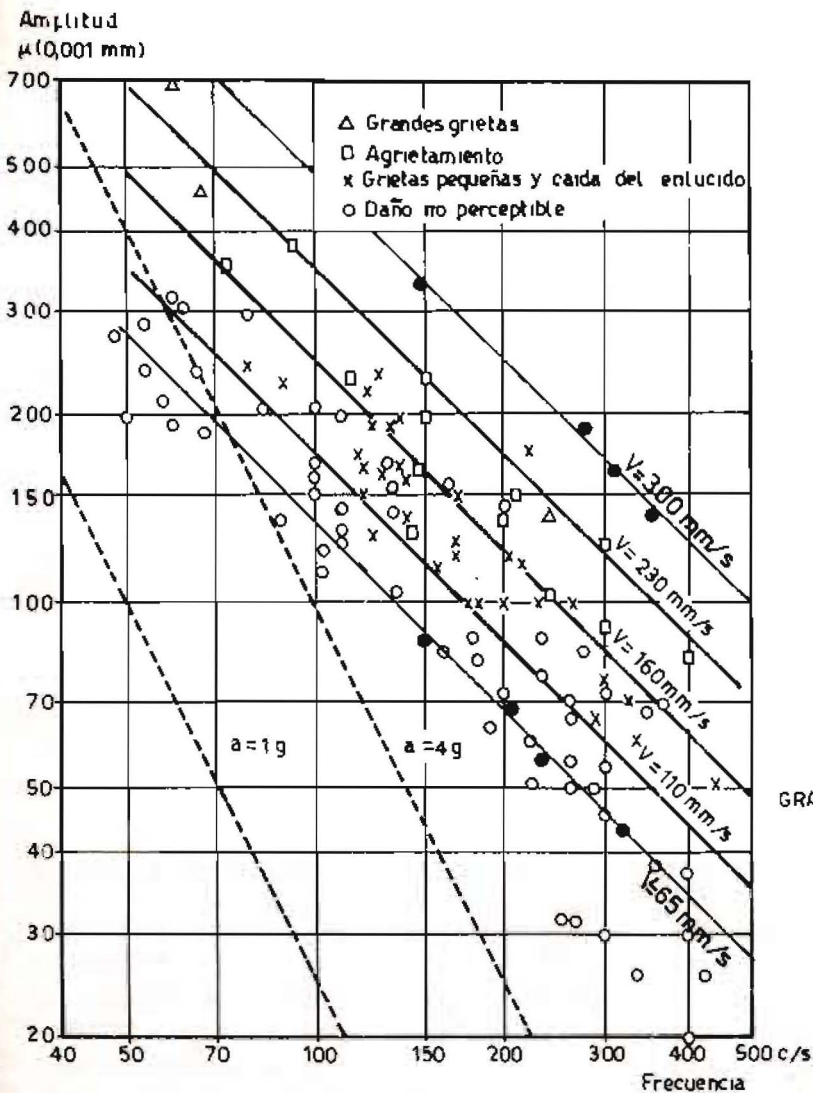


GRAFICO DE LANGEFORS Y KIHSTRÖM  
PAG Nº 298

Las líneas continuas dan las amplitudes y frecuencias correspondientes a velocidades constantes  $V = 230, 160$  y  $110$  mm/seg, o velocidades de vibración relativa (ángulo de cizalladura)  $v/c = 46, 32$  y  $22$  mm/m y las discontinuas representan valores de aceleración constante  $a = 1g$  y  $a = 4$  para rocas con velocidades de propagación de ondas elásticas longitudinales de  $5.000$  m/seg.

Existe también un gráfico en el que están volcadas las experiencias de Edwards y Northwood que es para bajas frecuencias y las variables que figuran son las mismas que en el gráfico anterior.

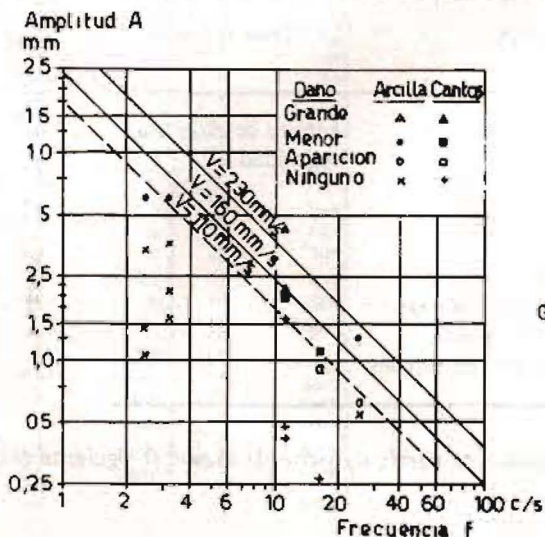


GRAFICO DE LANGEFORS Y KIHSTRÖM  
PAG Nº 300

## REDUCCION DE LAS VIBRACIONES

Hay diversas formas desarrolladas para reducir el nivel de vibraciones debidas a voladuras. A continuación se mencionan algunas de las técnicas de uso más común:

### 1) Voladuras de retardo:

Si se requiere una determinada cantidad de carga (Q) para volar un volumen V, también puede pensarse que esos parámetros pueden distribuirse convenientemente en el espacio y en el tiempo para lograr el mismo efecto pero con menores daños.

Para lo primero; espacio, una adecuada distribución de los barrenos que alojarán las cargas es lo más indicado y para el tiempo el uso de detonadores de micro retardo ayuda a solucionar el problema.

En general los detonadores de micro retardo vienen en series de "0" a "12" con intervalos entre cada uno de 20 a 30 milisegundos.

"Langefors" desarrolla la relación entre frecuencia (o su inversa, el período de vibración) y el espaciamiento en tiempo entre barrenos, asegurando que: "Las vibraciones del terreno causadas por una sola explosión adquieren una amplitud máxima A solamente después de una o varias deflexiones previas menores. La vibración normalmente es de duración relativamente corta y en la mayoría de los casos, se puede esperar que solamente tres vibraciones completas tengan una amplitud que llegue a A/2, todas las demás pueden más o menos despreciarse.

Esto significa que en los intervalos mayores de  $3T$  ( $T = 1/f$ , tiempo de un período completo) puede calcularse si hay o no colaboración entre 2 barrenos diferentes" (Se entiende por barrenos diferentes a los que tienen detonadores con distinto número de serie de micro retardo).

Se puede mostrar como ejemplo; frecuencias medidas en los sismogramas entre 140 y 180 c/seg y en este caso:

$$T_1 = 1/f_1 = 1/140 = 0.007 \text{ seg/ciclo} = 7 \text{ m seg/ciclo}$$

$$T_2 = 1/f_2 = 1/180 = 0.0056 \text{ seg/ciclo} = 5.6 \text{ m seg/ciclo}$$

De acuerdo a Langefors y Kihlström, si se fija la condición para que no se sumen vibraciones producidas por un barreno volado con un determinado retardo con respecto a otro de menor tiempo:

Condición de no cooperación:

$$\Delta t > n \cdot T$$

$$\Delta t > 2,5 T \quad \left\{ \begin{array}{l} n = 2, 3, 4, \dots \\ T = \text{período} \\ \Delta t = \text{intervalo de tiempo entre barrenos} \end{array} \right.$$

Para el ejemplo que nos ocupa sería:

$$\Delta t_1 = 17,5 \text{ mseg}$$

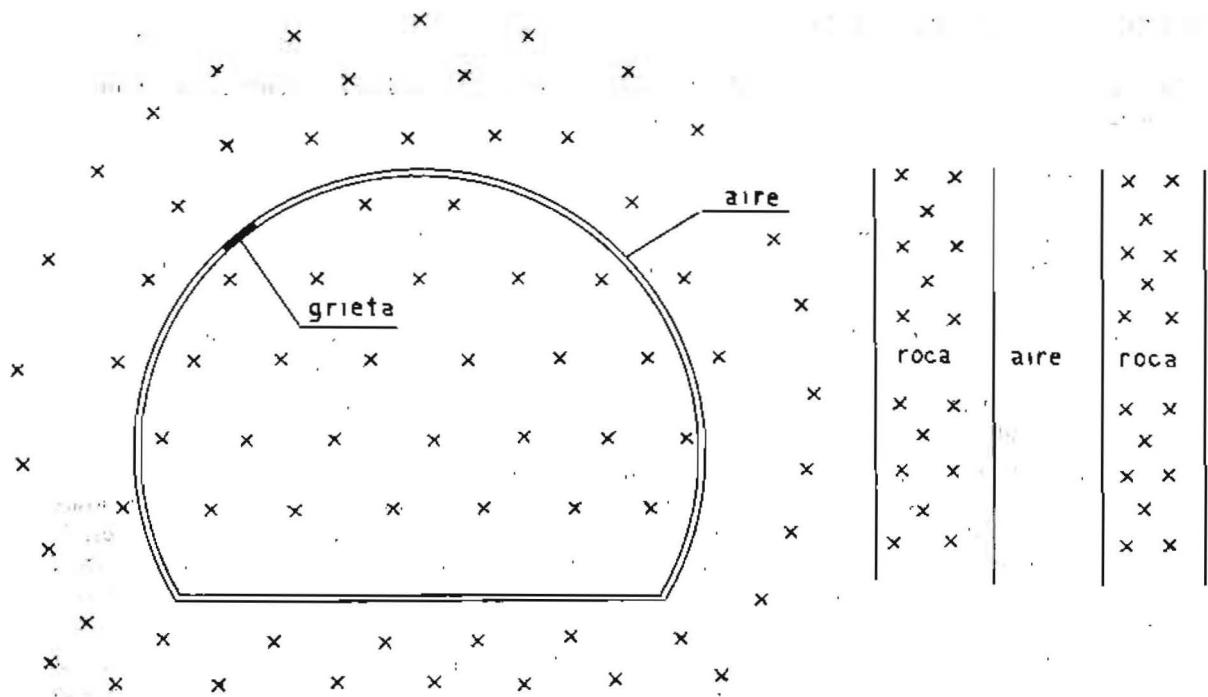
$$\Delta t_2 = 14 \text{ mseg}$$

Lo que indica que con una serie de retardo de 20 mseg sería suficiente para que no haya "colaboración" entre barrenos.

### 2) Voladuras con precorte

Para el caso de una excavación en la que a más de interesar el mínimo daño, importe también la geometría final, se ha desarrollado la técnica de precorte que simplemente consiste en explotar primero los barrenos de contorno con lo que supuestamente se logra una fisura o grieta que en el mejor de los casos separa el material de destrozar con el que debe permanecer intacto.

En este caso la grieta formada por el precorte actúa como aislador entre el macizo propiamente dicho y el frente volado, discontinuidad que teóricamente está llena de gases (producto de la explosión) y aire, ambos compresibles, actúan como atenuador de energía y se produce el siguiente fenómeno.



La energía generada por el explosivo en la roca se propaga por la misma con la velocidad característica, al llegar a la discontinuidad se produce un fenómeno de reflexión por cambio brusco de impedancia acústica, dicha energía se disipa como calor y rotura en el frente sin propagarse prácticamente al macizo.

Se aplica para demostrar lo anterior:

$$A_t = \frac{2 R_1}{R_1 + R_2} \cdot A_i \quad \text{y} \quad A_R = \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1} \cdot A_i$$

$A_i$  = Amplitud de la onda incidente

$A_t$  = Amplitud de la onda transmitida

$A_R$  = Amplitud de la onda reflejada

$R_1$  = Impedancia acústica del medio 1 (donde se genera la señal)

$R_2$  = Impedancia acústica de la discontinuidad

La impedancia sísmica  $R$  se define como:

$$R = \rho \cdot V$$

$\rho$  = Peso específico del medio

$V$  = Velocidad de propagación de la onda sísmica del medio.

Para ejemplificar, supongamos un medio cuya velocidad de propagación y peso específico sean:

$$V_1 = 5.200 \text{ m/seg}$$

$$\rho_1 = 2.800 \text{ kg/m}^3$$

$$R_1 = V_1 \cdot \rho_1 = 14.560.000$$

Para el aire se conoce que:

$$V_2 = 340 \text{ m/seg.}$$

$$\rho_2 = 1,239 \text{ kg/m}^3$$

$$R_2 = \rho_2 \cdot V_2 = 421,26$$



Si llamamos

$$\Delta = \frac{R_2}{R_1}$$

En la ecuación de  $A_t$

$$A_t = \frac{2 \cdot R_1}{R_1 + R_2} \cdot A_i = \frac{2}{1 + \frac{R_2}{R_1}} A_i = \frac{2}{1 + \Delta} A_i$$

Si  $\Delta \rightarrow 0$ ;  $\Rightarrow A_T \rightarrow 2 A_i$

Esto resulta un contrasentido pues se habría transmitido el doble de la amplitud incidente.

Entonces la ecuación:

$$A_R = A_i \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1} = \frac{\frac{R_2}{R_1} - 1}{\frac{R_2}{R_1} + 1} = \frac{\Delta - 1}{\Delta + 1}$$

Si  $\Delta \rightarrow 0 \Rightarrow A_R = -A_i$

Esto muestra que se produce una inversión de fase.

Este caso se resuelve aplicando la ecuación de la potencia sísmica

$$P = \frac{\text{Watt}}{\text{m}^3} = A^2 \cdot f^2 \cdot R$$

$P_t$  = Potencia transmitida =  $A_t^2 \cdot f^2 \cdot R_2$

$P_R$  = Potencia reflejada =  $A_R^2 \cdot f^2 \cdot R_1$

$P_i$  = Potencia Incidente =  $A_i^2 \cdot f^2 \cdot R_1$

$$\frac{P_R}{P_i} = \frac{A_R^2 \cdot f^2}{A_i^2 \cdot f^2} \cdot \frac{R_1}{R_1}$$

En este caso se puede aceptar que la frecuencia, tanto para la roca como para la discontinuidad es la misma.

$$P_R = P_i \frac{A_R^2}{A_i^2} = \frac{(R_2 - R_1)^2}{(R_2 + R_1)^2} \cdot P_i$$

Si  $R_2 \ll R_1$   $P_i \rightarrow P_R$

Esto implica que la potencia reflejada tiende a ser igual a la incidente.

Si se efectúa un análisis similar para el caso de la señal que pasó al aire de la interfase y que penetraría en el macizo, se llega a la conclusión que teóricamente la energía incidente es muy pequeña.

Luego se concluye que la vibración producida en el caso del precorte es pequeña, razón por la que se pueden incrementar las cargas en tanto y en cuanto el mismo haya producido una buena fisura.

## COMENTARIOS PRACTICOS

La experiencia realizada por los autores con mediciones efectuadas en excavaciones para grandes obras subterráneas, ha mostrado que para minimizar los daños por vibraciones producidas en las voladuras se debe observar cuidadosamente que:

- a) El uso de detonadores de micro retardo da resultados muy satisfactorios pero debe recalcar que cualquier plan teórico óptimo resulta como tal si es que se controla en su ejecución, pues errores en esta etapa pueden traer aparejados condiciones de cooperación entre barrenos.

Se cita como ejemplo que valores medidos en el orden de  $V_p = 25$  mm/seg se incrementaron, en una voladura de idénticas condiciones, a  $V_p = 85$  mm/seg. Analizando los sismogramas se constató que

un barreno había detonado en el mismo tiempo que otro adyacente cuando en el plan teórico debía hacerlo con un retardo en tiempo de 30 mm/seg.

- b) La técnica del precorte debe ser muy bien evaluada: antes de decidirla, por el incremento de costos que implica (mayor longitud y tiempo de perforación) y luego de decidida, porque si bien la formulación teórica nos muestra que es un excelente "amortiguador" de vibraciones sólo durante la ejecución se podrá confirmar en función que la grieta se forme en todos los barrenos de contorno y a lo largo de cada uno de ellos. Si así no fuere, la eficacia del mismo se ve sensiblemente disminuida.

De lo dicho resulta entonces la conveniencia de adoptar planes de acuerdo a las técnicas actuales, ejecutar voladuras de ensayo, medir las vibraciones que provocan, obtener las constantes locales y de acuerdo con ellas calcular el plan de avance, ejecutarlo con dedicación y controlarlo con mediciones sistemáticas que darán los valores de optimización en el mejor de los casos o de corrección si los ambientes en que se desarrolla la excavación no son uniformes.

## BIBLIOGRAFIA

- 1) Técnica Moderna de Voladura de Rocas  
Autor: U.L.F. Langefors y B. Kihlström  
Ed. URMO - (Bilbao) España, 1968
- 2) Técnica Sueca de Voladuras  
Autor: Rune Gustafsson  
Ed: SPI (Nora) España, 1977
- 3) Medición de Vibraciones  
Ing. Jorge L. González  
Informe técnico J.E. y P.R.III - C.H.R.G. N° 1 - AyEE.
- 4) Let's talk, about Ground Vibrations and their Effect on People and Buildings.  
ABEM. Geophisics y Electronics  
Reg. Code. AHB 62-01 - 1973 - 11